



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA DÍLCŮ TECHNOLOGIÍ MIKROTVÁŘENÍ

MANUFACTURING OF PARTS OF MICROFORMING TECHNOLOGIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Janoušek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Kamil Podaný, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Jiří Janoušek**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Kamil Podaný, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Výroba dílců technologií mikrotváření

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o zpracování literární studie využití technologie mikrotváření při výrobě dílců. Součástí práce bude rozbor jejího významu a příklady použití ve strojírenské praxi.

Cíle bakalářské práce:

- provést průzkum v oblasti technologie mikrotváření
- popsat princip a rozdělení
- uvést příklady metod
- zhodnotit využitelnost a problémy

Seznam doporučené literatury:

PETRUŽELKA, Jiří a Luboš PETRUŽELKA. Tvařitelnost a nekonvenční metody ve tváření: Tvařitelnost kovových materiálů. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2000. 146 s. ISBN 80-707-8635-3.

MATTA, Andrea a Quirico SEMERARO. Design of advanced manufacturing systems models for capacity planning in advanced manufacturing systems. Dordrecht: Springer, 2005. 267 s. ISBN 14-02-2931-4.

JESWIET, J., F. MICARI, G. HIRT, A. BRAMLEY, J. DUFLOU a J. ALLWOOD. Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal. CIRP Annals - Manufacturing Technology [online]. 2005, 54(2), 88-114 [cit. 2017-08-23]. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60021-3. ISSN 00078506. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607600213>.

HOSFORD, William F. a Robert M. CADDEL. Metal Forming: Mechanics and Metalurgy. 3th ed. New York: Cambridge University Press, 2007. 365 s. ISBN 978-0-521-88121-0.

MARTINS, P.A.F., N. BAY, M. SKJOEDT a M.B. SILVA. Theory of single point incremental forming. CIRP Annals - Manufacturing Technology [online]. 2008, 57(1), 247-252 [cit. 2017-08-23]. DOI: 10.1016/j.cirp.2008.03.047. ISSN 00078506. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850608001248>.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

JANOUSEK Jiří: Výroba dílců technologií mikrotváření.

Práce pojednává o technologii bodového tváření, které je v dnešní době v rozmachu díky možnosti naprogramovat přesnou cestu jednoduchého nástroje a realizovat ji na moderních CNC strojích. Řeší síly v procesu, výslednou drsnost povrchu výtažků nebo jejich přesnost. Tato technologie se dělí na jednobodovou a dvoubodovou a využívá lepší tvářitelnosti materiálu při malém lokálním dotyku. Díky tomu má uplatnění v mnoha oborech jako je lékařství, či automobilový průmysl. Využívá se na výrobu prototypů a specifických součástí, na které by byly potřeba drahé formy.

Klíčová slova: bodové tváření, jednobodové tváření, dvoubodové tváření, kovotlačení, tažení

ABSTRACT

JANOUSEK Jiří: Manufacturing of parts of microforming technologies.

This work deals with point incremental forming technology, which is now booming thanks to the possibility to program the exact path of a simple tool and to implement it on modern CNC machines. It solves the forces in the process, the roughness of the final surface of the products or their accuracy. This technology is divided into one-point and two-point forming and uses better material formability because of little local touch. Thanks to this, it is used in many fields such as medicine or the automotive industry. It is used to produce prototypes and specific components, which would be expensive.

Keywords: point forming, one-point forming, two-point forming, spinning, drawing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JANOUSHEK, Jiří. *Výroba dílců technologií mikrotváření*. Brno, 2018. 26 s, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Kamil Podaný, PhD.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Moutnicích dne 22.5.2018

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Kamilovi Podanému, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Také bych rád poděkoval své rodině a zejména rodičům za neustálou podporu ve studiu.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

	Str.
ÚVOD	9
1 TECHNOLOGIE BODOVÉHO TVÁŘENÍ	10
1.1 Kovotlačení	13
1.2 Dvoubodové tváření	15
1.3 Jednobodové tváření	16
2 NÁSTROJE	19
3 STROJE	21
4 POUŽITÍ	24
5 ZÁVĚRY	26

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratek

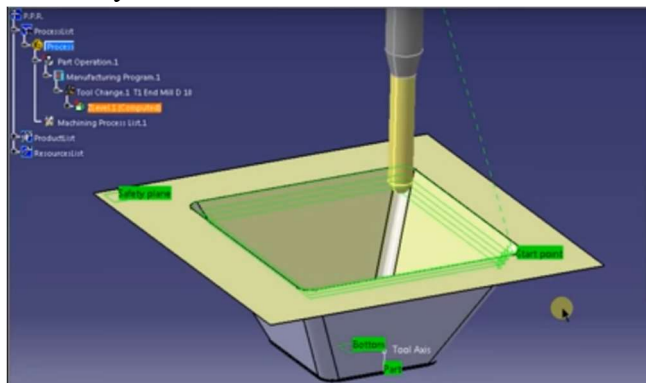
Seznam obrázků

ÚVOD [1], [2], [3], [4]

Minimalizace je směr, kterým se vydává čím dál víc oborů po celém světě. Snaha o zmenšení velikosti rozměrů součástí je patrná v mnoha oblastech, zejména hlavně v elektronice, ale také v technologii mikrosystémů nebo ve zdravotnictví. Jako příklad lze uvést chytré telefony, kde výrobci usilují stále o tenčí a lehčí modely a zároveň o zlepšení vlastností hardwaru. Vyrábí se chytré hodinky se zabudovaným fotoaparátem, USB flash disky s vysokou úložnou kapacitou (2TB), které se vejdou do dlaně, nebo elektrické mikropohony, které se mohou podílet na záchraně lidského života při pohánění medicínských robotů.

Díky všem různým výzkumům a testováním byly zjištěny zlepšené podmínky tváritelnosti při malém lokálním doteku nástroje s tvářeným materiálem. Tento objev, a zároveň velký rozmach číslicově řízených strojů a modelových CAD softwarů (obr. 1), dal vzniknout novým nekonvenčním metodám tváření.

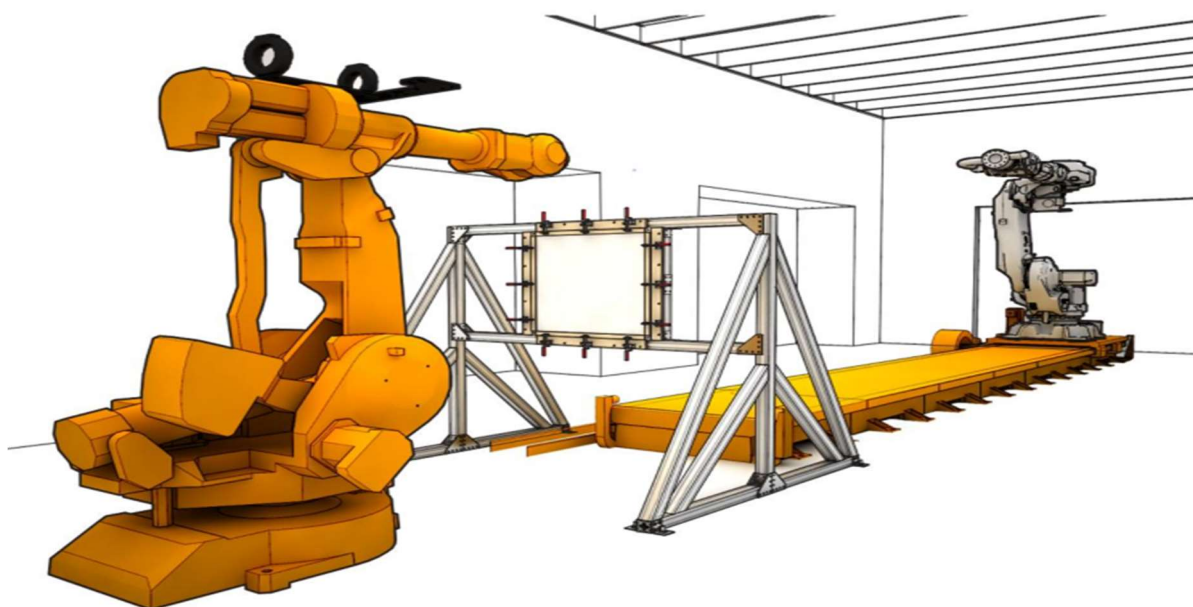
Jednou z nich je bodové tváření (obr. 3), které se začalo zkoumat již v sedmdesátých letech 20. století. Velký rozmach ale zažívá až v posledních dvaceti letech, právě díky možnosti naprogramovat přesný pohyb nástroje podle předem připraveného CAD modelu vyráběné součásti. To dává schopnost vytvářet díly všemožných tvarů a velikostí, které jsou limitovány pouze pracovním prostorem. Tato technologie se používá na výrobu zkušebních prototypů nebo například v lékařském průmyslu, kde se vytváří dílce, které nahrazují části lidské lebky (obr. 2).



Obr. 1 Cesta nástroje v CAD softwaru [4]



Obr. 2 Lebeční protéza vyrobená metodou bodového tváření [3]



Obr. 3 Bodové tváření pomocí robotického ramene [5]

1 TECHNOLOGIE BODOVÉHO TVÁŘENÍ [2], [3], [6], [7]

Základem metody bodového tváření je jeden tvářecí nástroj, který má většinou tvar ocelové tyče s hladkým polokulovým hrotem. Jeho pohyb je obvykle popsán v kartézském souřadnicovém systému, kde osy x a y určují vodorovný pohyb v rovině tabule plechu a osa z řídí pohyb nástroje ve svislém směru, tedy ve směru deformace. Jeho pohyb je řízen CNC zařízením a jedná se o postupné kontinuální vtlačování nástroje do tabule plechu, která je uchycena v přidržovacím rámu. Zároveň nástroj může být roztočen na určitou úhlovou rychlost pro dosažení lepší tvářitelnosti.

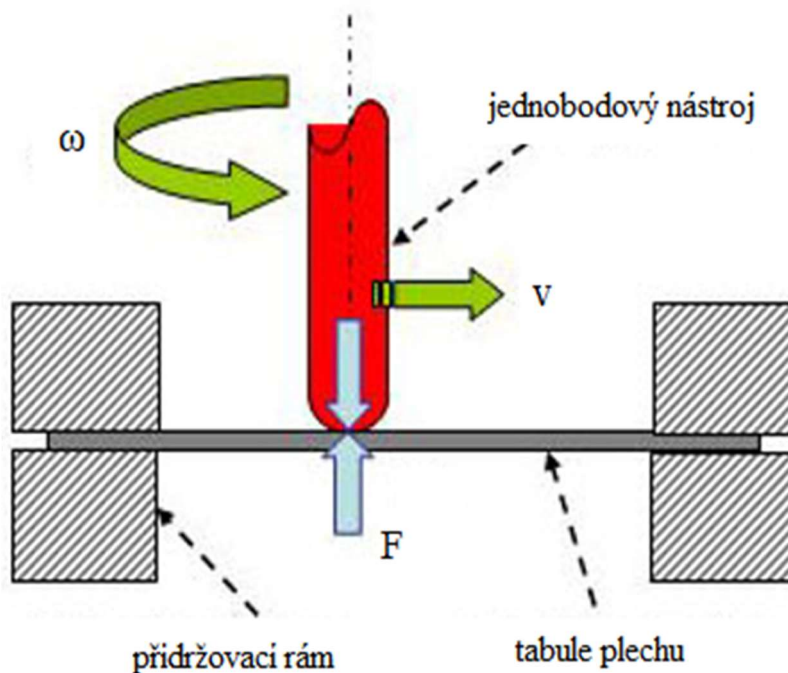
Proces bodového tváření se vyznačuje zvýšenou tvářitelností materiálu, a to zejména díky bodovému dotyku, který tvoří pouze malou plastickou plochu mezi nástrojem a výtažkem, a má velmi blízko k rovinné deformaci. Tvářecí operace zde mohou být prováděny na tři a více kroků.

Proces bodového tváření musí mít přesně definované parametry:

- jedná se o tvarové tváření kovů,
- má pevný nástroj o malé velikosti,
- nepoužívají se různé tvarové nástroje,
- tvářecí nástroj je nepřetržitě ve spojení s výtažkem,
- nástroj se řízeně pohybuje ve třírozměrném prostoru,
- může vytvářet nesymetrické výtažky.

Jak lze vidět na obrázku 4 k provedení této technologie jsou potřeba čtyři stavební prvky:

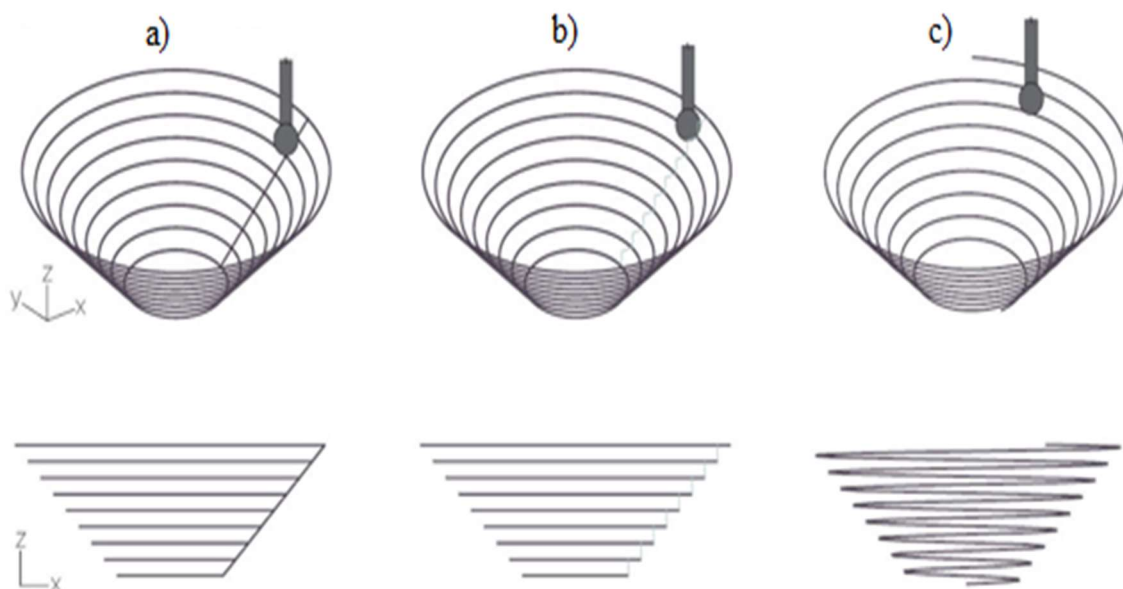
- tabule plechu,
- přidržovací rám,
- bodový tvářecí nástroj,
- číslíkový stroj řídící pohyb.



Obr. 4 Základní prvky jednobodového tváření [2]

Dráha nástroje se může lišit při různých tvářeních. Existují tři základní možnosti, jak naprogramovat dráhu nástroje. První z nich se řídí pomocí obrysů geometrie výtažku

a při přesunu na další úroveň v ose z se pohybuje diagonálně v rovině xz. Tím se vytvoří hladká linie na místě, kde se nástroj přesouvá do dalších úrovní, viz obr. 5a. Druhá možnost se také řídí pomocí obrysů, ale při poklesu na další úroveň se nástroj nejprve posune v rovině xy a až poté v ose z. To má za následek schodovitý tvar celého výtažku, jak lze vidět na obrázku 5b. Posledním typem je dráha spirálová, kde se nástroj vždy pohybuje v osách x, y i z a kontinuálně vykresluje tvar geometrie výtažku (obr. 5c).



Obr. 5 Dráha nástroje [7]

Pro správné navržení tvářecího procesu je důležité vědět, jaké síly v něm působí. V daném okamžiku se silové působení nástroje na tabuli plechu dá rozložit do os kartézského souřadného systému, viz obr. 6. Největší a zároveň nejdůležitější silou je ta, která působí v ose z, podle které se volí stroj a nastavuje celý proces tváření. Proto se muselo přijít na výpočtový model, který dá alespoň přibližné informace o velikosti této síly. Vzorec, který je výsledkem experimentální práce, zahrnuje různé parametry jako je například volba materiálu, tloušťka plechu nebo rozměry nástroje. Tento vzorec je ve tvaru:

$$F_z = 0,0716 \cdot R_m \cdot t^{1,57} \cdot d_t^{0,41} \cdot \Delta z^{0,09} \cdot \alpha \cdot \cos \alpha \quad (1.1)$$

kde: R_m – mez pevnosti v tahu [MPa]

t – tloušťka plechu [mm]

d_t – průměr nástroje [mm]

Δz – posuv nástroje ve směru osy z [mm]

α – stěnový úhel [°]

Posuv v ose z velikost síly ovlivňuje minimálně, a proto se často nastavuje větší, aby se dosáhlo kratších výrobních časů. Dobře se dá také manipulovat s velikostí nástroje, která podobně nemá příliš velký vliv na výslednou sílu a dá se tak dosáhnout lepší drsnosti povrchu výtažku nebo snížit délku dráhy nástroje. Největší vliv na velikost síly má stěnový úhel α , kde při tváření velkých sklonů dochází ke značným problémům.

Při tažení také dochází k ztenčení stěny, což je typickým jevem pro tuto technologii a vypočítá se lehce jako násobek funkce sinus stěnového úhlu a původní tloušťky plechu:

$$t_f = t \cdot \sin \alpha \quad (1.2)$$

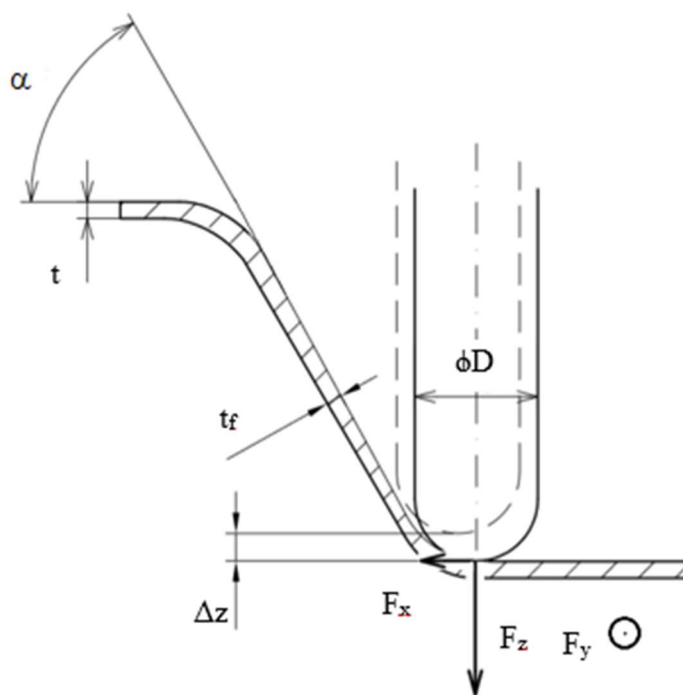
kde: t_f – finální tloušťka plechu [mm]

Je zřejmé, že při větším stěnovém úhlu dochází k většímu ztenčení, a tedy i k horší tváritelnosti materiálu. Proto se zavedla veličina α_{\max} , která je charakteristická pro každý materiál a určuje hodnotu úhlu, který se dá vytáhnout na jeden krok. Bývá určována experimentálně a je rozdílná i pro různé tloušťky plechů stejného materiálu.

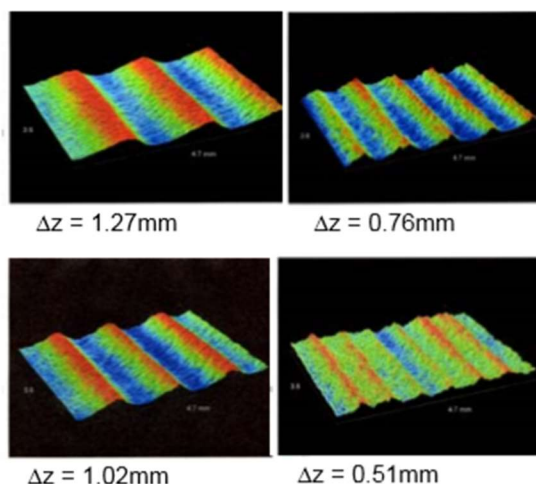
V některých případech použití sinova zákona neodpovídá praxi a to zejména při procesech, kde se tváří větší stěnové úhly, a tak nastává větší zatížení materiálu. Dochází zde k prudkému poklesu tloušťky stěny na začátku procesu a dále si materiál udržuje takřka konstantní tloušťku. Je snaha ztenčování snižovat pomocí různých metod postupného tváření nebo také různými modifikacemi dráhy nástroje.

Další důležitou částí procesu je výsledná drsnost povrchu tvárené součásti. Hlavním faktorem ovlivňující tuto veličinu je velikost posuvu nástroje Δz , jak lze vidět na obrázku 7, kde při menší velikosti Δz vznikne povrch, který je sice více vlnitý, ale vlnky mají mnohem menší velikost. Dále drsnost závisí na poloměru nástroje r a stěnovém úhlu α . Tyto faktory se navzájem ovlivňují a jejich závislost lze vidět na obrázku 8.

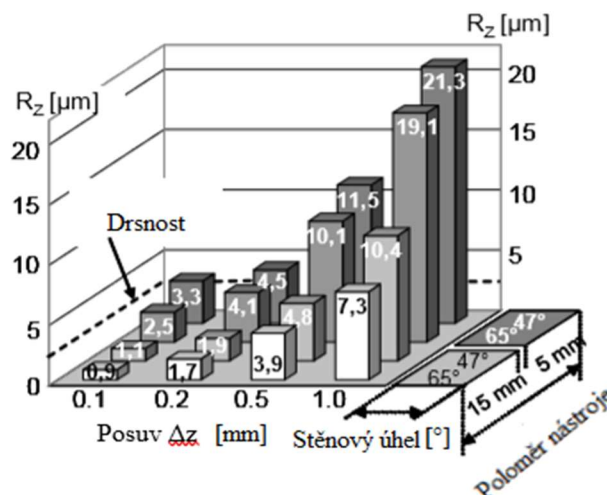
K dalším způsobům, jak ovlivnit drsnost povrchu, je správné nastavení otáček vřetene nebo snížení relativní rychlosti nástroje vůči výtažku. Toto také sníží pravděpodobnost odlupování vrchního materiálu důsledkem opakovaného namáhání. Při návrhu procesu je také potřeba dát pozor na stěny s velkým úhlem sklonu, kde může dojít ke zvlnění povrchu a tzv. efektu pomerančové kůry.



Obr. 6 Rozložení sil a ztenčení stěny při tváření [2]



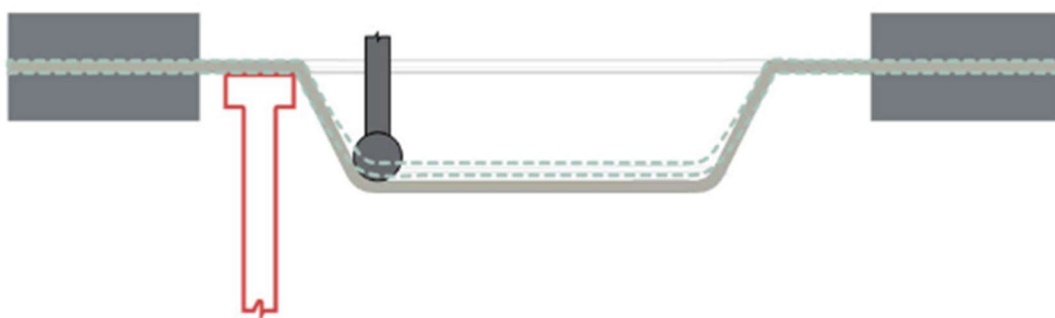
Obr. 7 Drsnost povrchu při změně Δz [2]



To, kde má tato technologie nedostatky, je přesnost vytažených součástí. U většiny konvenčních technologií bývá přesnost vyrobených dílů do jednoho milimetru, u některých i lepší. Při klasickém bodovém tváření se rozměry mohou lišit o ± 2 mm v porovnání s geometrií CAD modelu. Přesnost může být ovlivněna mnohými parametry, jako jsou například:

- materiál
- geometrie dílce
- posuv nástroje v ose z
- typ dráhy nástroje
- použitý stroj

V procesu se to projevuje různými způsoby. Jeden z nich je ten, že špička nástroje je vychýlena tlakem materiálu a nekoná tak pohyb po předem stanovené dráze, nýbrž těsně vedle ní. Hlavním problémem je však odpružení, se kterým se musí počítat a proces předem naprogramovat tak, aby se co nejvíce eliminovalo. V tomto hraje velkou roli stěnový úhel a to tak, že stěny s menšími úhly mají tendenci se přehýbat a stěny s většími úhly naopak (obr. 9). K analýze výsledného tvaru se dají použít metody konečných prvků, kde však výpočty trvají několik hodin i dní. V dnešní době se dá různými úpravami procesu dosáhnout u dílců menších rozměrů přesnosti pod 1 mm.



Obr. 9 Odpružení materiálu [7]

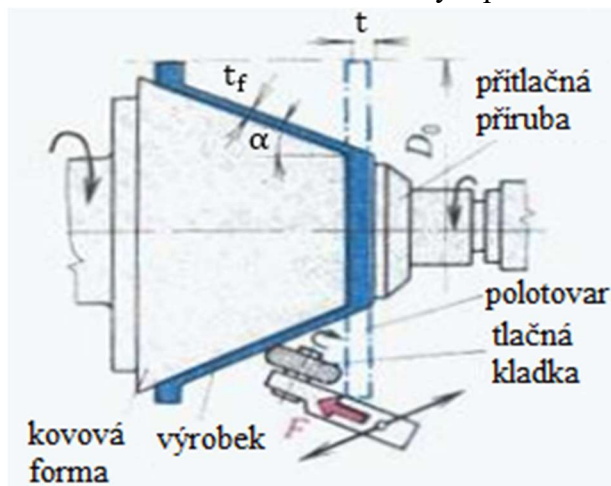
Jednou z metod pro zpřesnění výsledných rozměrů je zpětné dokončování, které pracuje tak, že se „nahrubo“ vytáhne přibližný tvar dílce a druhou operací se dílec vytáhne do požadovaného tvaru. Může se použít i více kroků tažení, ale nevýhodou této metody je velké prodloužení výrobního času, a také špatná drsnost vyrobené součásti. Další metoda spočívá v iterativním opravení CAD modelu, kde se upravuje odchylka pro každý bod, dokud se nedosáhne požadovaných parametrů. Nevýhodou této metody je zdoluhavá příprava modelu, a proto není vhodná pro dílce, které se vyrábí pouze jednou a byla by nutná výroba zkušebních dílů.

1.1 Kovotlačení [8], [9], [10], [11], [12], [13]

Technologie kovotlačení je samostatným typem tváření, které je založeno na bodovém dotyku nástroje s polotovarem. Tato technologie je známá spoustu let a v dnešní době dochází k jejímu velkému rozmachu. Díky kvalitativnímu posunu výroby a automatizaci se často používá k výrobě dutých rotačních těles, a to jak s kruhovým, tak i eliptickým průřezem.

Základní princip výroby je takový, že se přístřih vloží mezi přitlačnou přírubu a formu taženého dílce, která je připevněna ve sklíčidle. Po roztočení je polotovaz přitlačován pomocí tlačné kladky na formu, dokud není přetvářen na tvar modelu, viz obr. 10.

Existují dva způsoby, a to bez ztenčení, nebo se ztenčením stěny. Bez ztenčení stěny, také prosté tlačení, je dávný způsob, který se používá už stovky let a zpravidla se jím tváří nádoby s vydutou stěnou. Druhý způsob využívá smykového tažení, díky němuž dochází ke ztenčení stěny. Potom má původní tloušťku plechu pouze dno výtlačku a tloušťka stěny záleží na tvářeném úhlu a řídí se sinusovým pravidlem, viz ob. 6.



Obr. 10 Princip kovotlačení [8]



Obr. 11 Kryt kola [12]

Drsnost vnitřního povrchu kopíruje drsnost použité formy, proto je důležité používat vždy kvalitně zpracované formy. Vnější povrch je závislý na mnoha faktorech, jako je geometrie dílce, povrch použité kladky a nastavení rychlosti či posuvu.

Kovotlačení je dobrou náhradou pro hluboké tažení, které vyžaduje více operací, také umožňuje lemování, obrubování, osazování nebo zužování a rozšiřování. Je ekonomicky nenáročné, protože se dá provádět na konvenčních strojích, jako jsou soustruhy nebo automatizované CNC stroje.

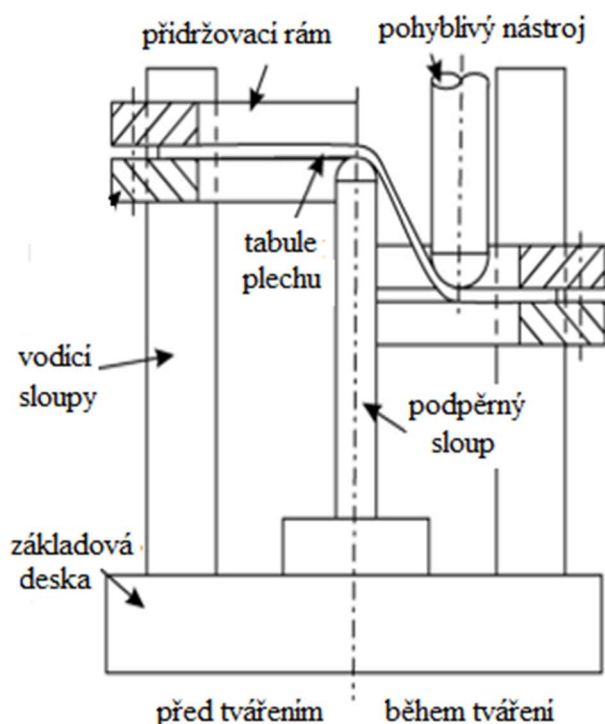
Dílce, které se touto technologií vyrábí jsou různé nádoby, vázy nebo poháry, které mají i dekorativní funkci, také se s ní dělá nádobí, jako jsou hrnce nebo pánve. Dalším odvětvím, kde má svoje místo, je tváření nových dílců na opravu veteránů, jako jsou světla či poklice na kola (ob. 11).



Obr. 12: Kovotlačení [13]

1.2 Dvoubodové tváření [2], [7], [14], [15]

Za základ moderního rozvoje bodového tváření se dá považovat patent, který podala v roce 1994 firma Matsubara a zahrnoval jak metodu, tak i přístroj na kterém se provádí. Na obrázku 13 lze vidět, že plech byl uchycen v pasivně pohyblivém rámu a podpírán uprostřed jednoduchou tyčí s kulovým zakončením. Tato metoda dala vzniknout všem postupům a mechanismům, jak dvoubodového, tak i jednobodového tváření, které se v dnešní době používají.

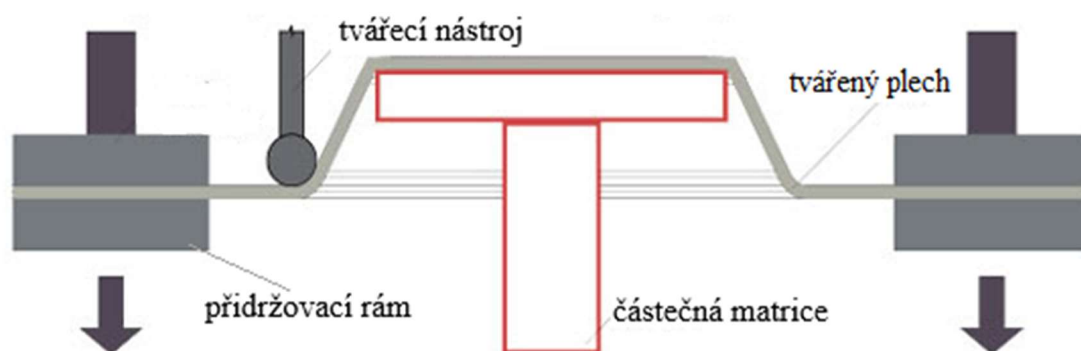


Obr. 13 Patent Matsubara [14]



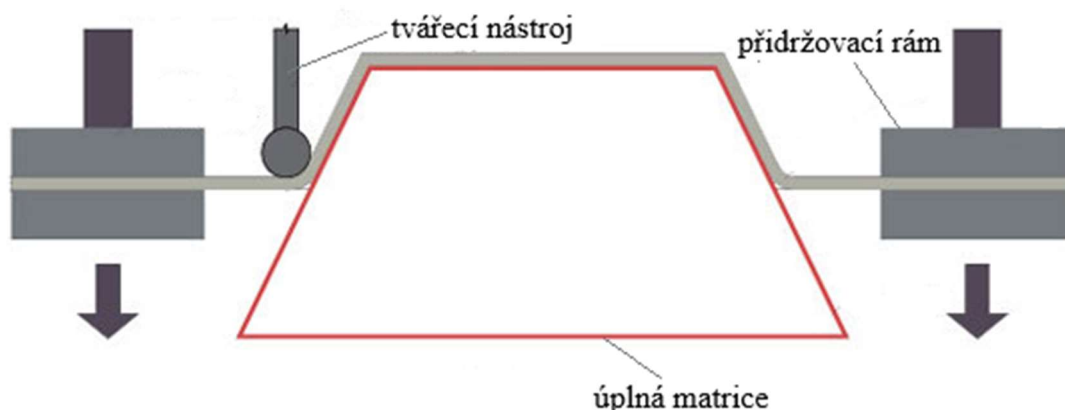
Obr. 14 Dvoubodové tváření v praxi [15]

Použití této metody v praxi můžeme vidět na obrázku 14 a její mechanismus je takový, že přidržovací rám, do kterého se upevňuje tabule plechu, je upevněn na podpěrných sloupech pomocí ložisek. Tyto ložiska mu umožňují vertikální pohyb ve směru osy z. Po vtláčení nástroje do plechu vzniknou dvě místa, kde je plech stlačován, a to v okolí nástroje a v okolí matrice. K plastické deformaci dochází však primárně pod tvářecím nástrojem. Matrice, která je statickým prvkem soustavy, vytváří reakční sílu na nástroj a může mít tvar stacionárního sloupu (obr. 15), která podepírá tabuli plechu uprostřed, nebo může být přímo ve tvaru vyráběného



Obr. 15 Dvoubodové tváření s částečnou maticí [7]

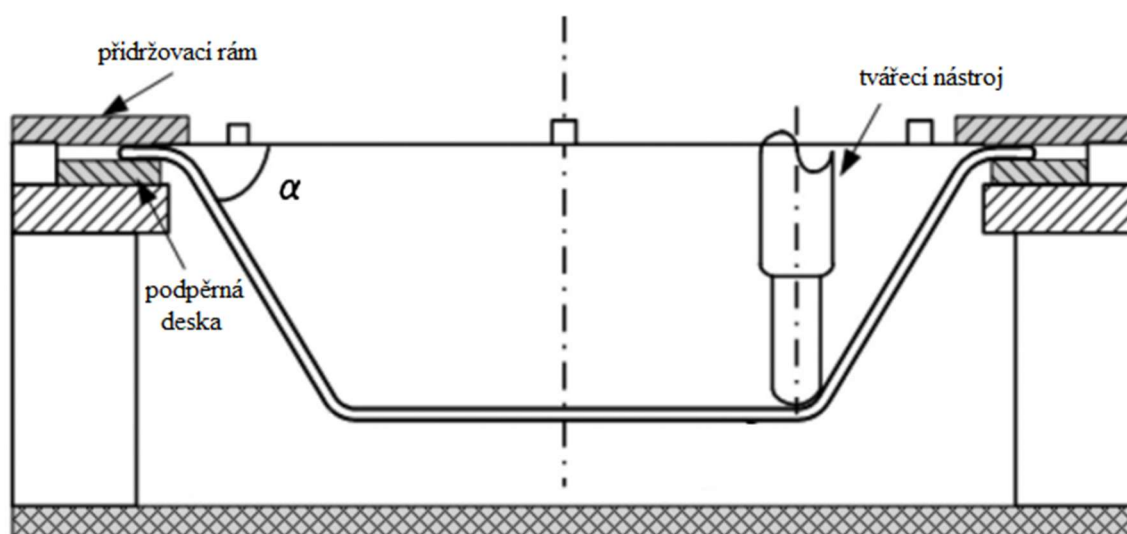
dílce (obr. 16). K přidržovacímu rámu se také používá podpěrná deska, která je uložena pod polotovarem. Má bránit zkroucení dílce a rovněž zajišťuje zpětný tlak na plech.



Obr. 16 Dvoubodové tváření s úplnou maticí [7]

1.3 Jednobodové tváření [2], [6], [7], [16], [17], [18], [19]

Tato metoda byla vyvinuta jako pokračování dvoubodového tváření a je založena na stejném principu. Hlavním a největším rozdílem u těchto metod je použití matrice. Jednobodové tváření žádnou matici nepoužívá. Tedy materiál se nemá o co opřít a je tvářen do volného prostoru. To v něm vyvolává rozdílné deformace a napětí, což se projevuje hlavně větším odpružením. Nepřítomnost matrice je alespoň z části nahrazována podpěrnou deskou (obr. 17).



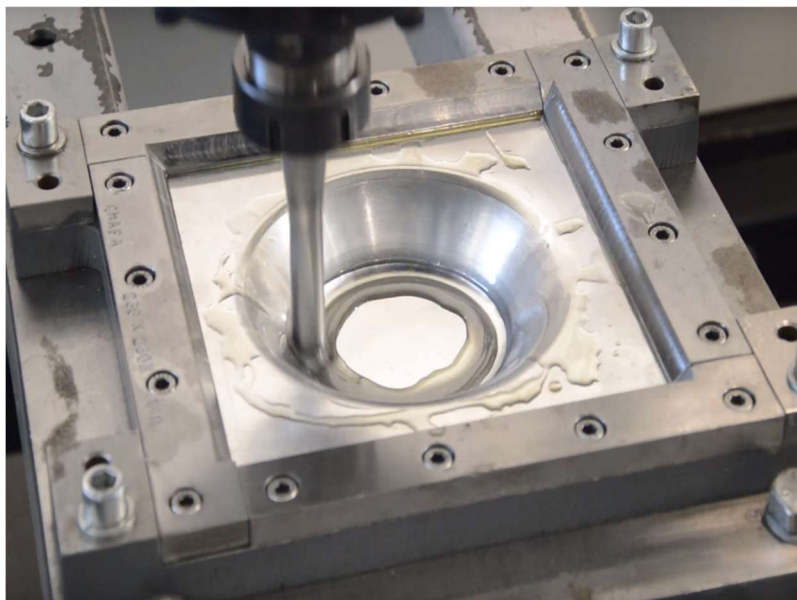
Obr. 17 Jednobodové tváření [18]

Nespornou výhodou jednobodového tváření je, že součást lze vytvářet přímo z CAD souboru a nejsou nutné žádné úpravy a složité plánování tras. Rovněž nejsou potřeba různé nástroje, a tedy pořizovací náklady výtažku nejsou vysoké. Toto je umocněno možností provedení procesu na konvenčních CNC strojích (obr. 18). Další výhodou je, že rozměr výtažku je limitován pouze pracovní oblastí stroje. Síly potřebné pro tváření zůstávají stále stejné, neboť plocha kontaktu a velikost přírůstku jsou malé a neměnné. Taktéž po tažení dojde ke zlepšení povrchu výrobku.

Velkou nevýhodou procesu je jeho délka. V porovnání s konvenčními metodami se zde dosahuje mnohonásobně větších časů. Výroba jednoho kusu může trvat několik hodin, ba dokonce i dnů. Tudíž tato metoda není vhodná pro velkosériovou výrobu a používá se spíše pro výrobu prototypů, nebo malých sérií. Značný problém představuje také odpružení

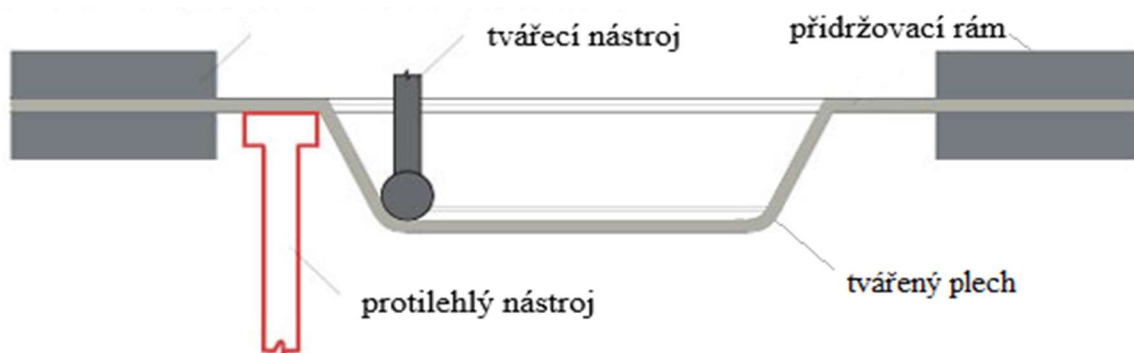
materiálu, které je zde oproti ostatním metodám tváření značně větší a musím se s ním vypořádávat různými způsoby, jako například tvářením protilehlým nástrojem nebo ohříváním materiálu.

Pro alespoň částečnou redukci těchto nedostatků se může použít druhý nástroj, který působí na opačné straně plechu a umožňuje tak lepší tvářecí podmínky. Existuje více variant použití protilehlého nástroje, kde jednu lze vidět na obrázku 19. Jedná se o variantu s nástrojem pro periferní opření, kdy pomocný nástroj se pohybuje podél tvářené hrany a působí jako páka pro lepší tlak primárního nástroje. Druhý způsob použití pomocného nástroje můžeme vidět na obrázku 20.

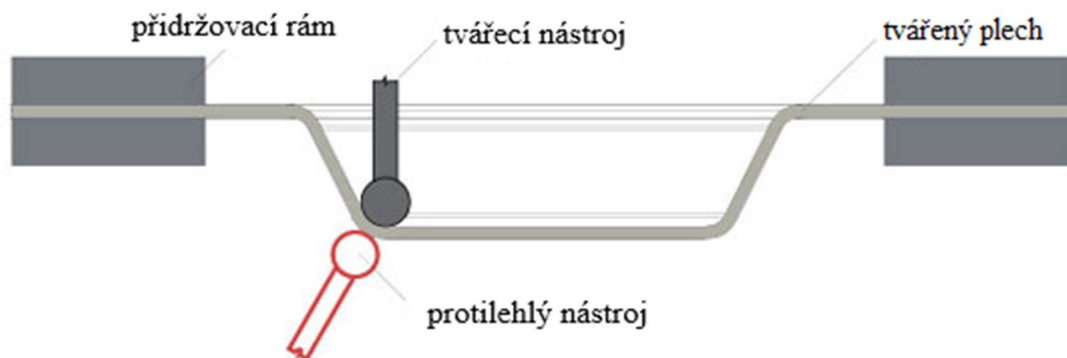


Obr. 18 Jednobodové tváření v praxi [19]

Jedná se o lokální podpůrný nástroj, který z druhé strany plechu kopíruje pohyb primárního nástroje. Velký problém ovšem nastává při vytváření dráhy pro tenhle pomocný nástroj, jelikož při procesu dochází ke ztenčování stěny a nástroj se musí vždy dotýkat tvářeného plechu.



Obr. 19 Duplexní bodové tváření s nástrojem pro periferní opření [7]



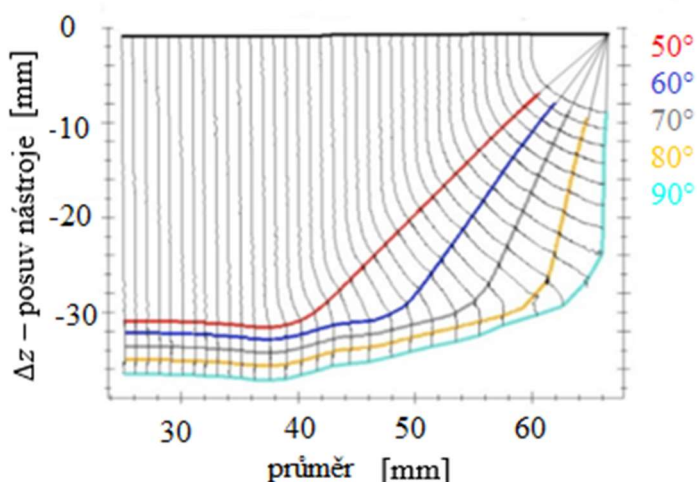
Obr. 20 Duplexní bodové tváření s lokálním podpůrným nástrojem [7]

Další problém představuje neschopnost tvářet stěny s úhlem blízcí se 90° . Tyto stěny se musí tvářet na více operací. K optimalizaci tohoto postupu bylo vynaloženo velké úsilí a zkoumali se tři různé techniky, jak správně postupovat:

- zvětšování průměru
- zvětšování úhlu stěny
- zvětšování výšky dílu a úhlu stěny

Jako nejlepší cesta se ukázalo spojení zvětšování úhlu stěny společně s průměrem, a také pro zkvalitnění výsledného výtažku se může použít kombinace dráhy nástroje od kraje ke středu (out-to-in) a od středu ke kraji (in-to-out). Postup vícekrokového tváření můžeme vidět na obrázku 21.

Ke zvětšení tvářicího úhlu se dá také použít metoda optimálního natočení výrobku, kde osa nástroje není kolmá na tvářený plech. To má za následek snížení úhlu v kritické oblasti, a naopak zvětšení u jiné stěny, viz obr. 22.



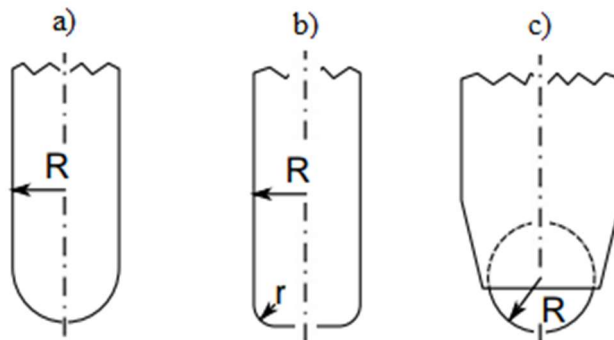
Obr. 21 Vícekrokové tažení [2]



Obr. 22 Optimalizace pracovního prostoru [2]

2 NÁSTROJE [2], [3], [6], [7], [20], [21], [22]

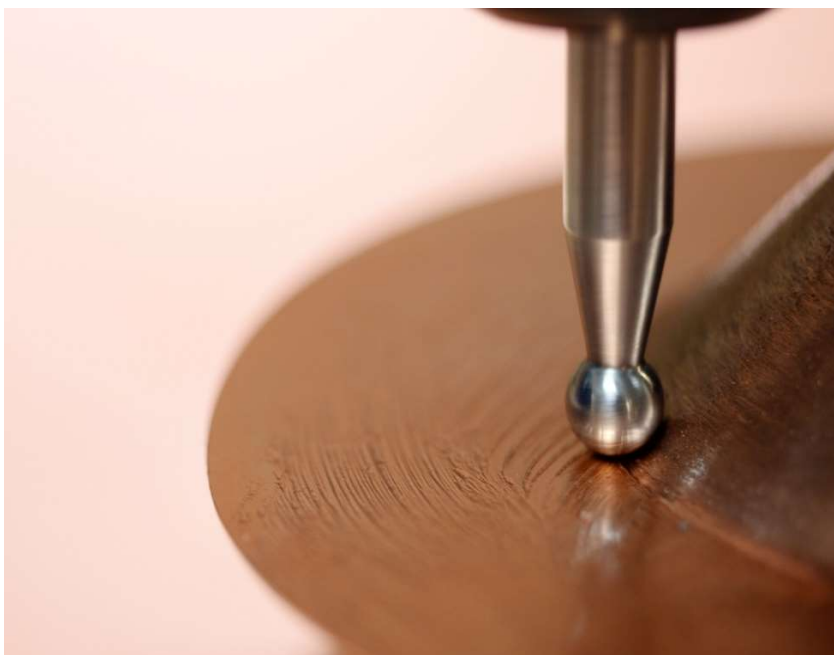
Při volbě nástroje je nejdůležitější dbát na to, aby při celém procesu měl nástroj kontinuální dotyk s tvářeným plechem. Nejčastěji se používá kovový hrot s polokulovým koncem (obr. 23a). V posledních letech se také začala používat hlava s plochým zakončením (obr. 23b), která zajišťuje lepší tváritelnost a ve výsledku větší přesnost profilu. Další možností je nástroj s kuličkou uloženou volně tak, aby se mohla točit všemi směry (obr. 23c). To má za následek snížení tření mezi nástrojem a povrchem výtažku. Je možná i konfigurace s různým umístěním kuličky na stopce, viz obr. 24. Při tváření velmi strmých úhlů, je nutné použít užší stopku nástroje, než je samotná polokulová hlava, aby se zabránilo kontaktu stopky s povrchem výtažku, viz obr. 25.



Obr. 23 Typy nástrojů [2], [20], [22]



Obr. 24 Nástroj s kuličkou [20]

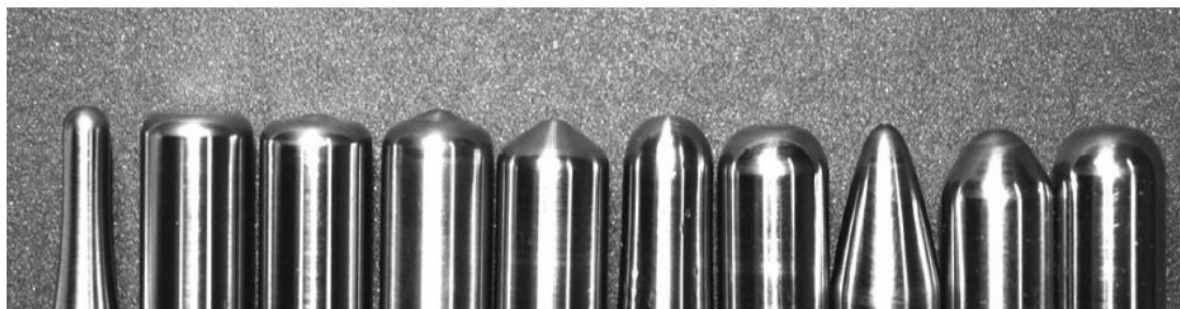


Obr. 25 Nástroj s užší stopkou [21]

Škála velikostí průměrů hlavy je široká a pohybuje se mezi 5-100 mm. Tento rozměr se volí podle nejmenšího konkávního poloměru, kterého je v dané operaci potřeba dosáhnout a od něj se také odvíjí přesný tvar hrotu, který může být proveden mnoha způsoby, jak lze vidět na obrázku 26. Při zvolení menšího průměru se dají tvářet stěny s větším úhlem sklonu, ale také se podstatně zvětšuje výrobní čas, neboť nástroj musí urazit delší dráhu. Nejčastější poloměry se volí mezi 10 a 15 milimetry.

Nejběžnějším materiálem pro výrobu je nástrojová ocel třídy 19. Z pravidla je nástroj monolit a v některých případech se mohou používat hlavy potažené slinutými karbidy, které prodlužují jeho životnost, a také snižují tření. U některých operací je možné použít i plastový nástroj, a to zejména v případech, kdy by mohlo dojít k poškození povrchu chemickými

reakcemi. Ke snížení opotřebení nástroje a lepší kvality povrchu se také často používají různá maziva.

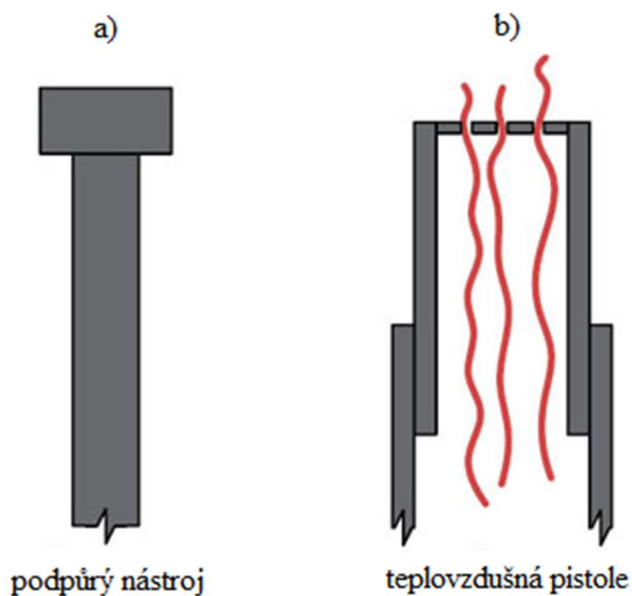


Obr. 26 Typy hlav nástrojů [22]

Existují ještě dva speciální druhy nástrojů, které se používají při duplexní tváření jako sekundární nástroj. Tyto nástroje mají za úkol zkvalitnit tvářecí proces, aby se dosáhlo lepšího výsledku.

První z nich je podpůrný nástroj s plochou hlavou a silným tělem (obr. 27a). Má za úkol poskytovat páku hlavnímu nástroji a pohybuje se po obvodu tvářeného tvaru, viz obr. 28. Díky tomu se zvětšuje přesnost daného procesu.

Druhý je potom teplovzdušná pistole (obr. 27b), která kopíruje dráhu tvářecího nástroje, a tak nahřívá polotovar na určitou teplotu. To má za následek lepší tváritelnost materiálu a tím pádem možnost tvářet větší hloubky nebo plechy s větší tloušťkou. I díky zahřátí se může zlepšit přesnost výsledného výrobku.



Obr. 27 Sekundární nástroje [7]



Obr. 28 Podpůrný nástroj v praxi [7]

3 STROJE [2], [3], [7], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29]

Jedním z hlavních aspektů, který zapříčiňuje růst technologie bodového tváření, je ekonomická nenáročnost, a to hlavně díky tomu, že není potřeba žádný speciální stroj, ale stačí pouze konvenční CNC obráběcí stroj, či frézka nebo rameno robota. Jediné omezení je, že stroj musí mít číslicově řízené, tříosé vřeteno, respektive rameno.

Základní tři typy číslicově řízených frézek, které se používají jsou:

- Portálová – u ní je rám s polotovarem upevněn na pracovním stole a vřeteno s nástrojem se pohybuje na příčnici. Tato varianta poskytuje velký pracovní prostor, vysoké rychlosti posuvů a díky dobré tuhosti se dají vyvinout veliké síly. Její nevýhodou je však vysoká cena portálových frézek (obr. 29).
- Stolová – ta má příčný i podélný stůl, který má přesně stanovenou výšku a pohybuje se tak pouze v rovině xy. Pohyb v ose z je zajištěn posouvajícím se vřetenem. I tato frézka také poskytuje větší pracovní prostor, který je však omezen jeho šířkou, proto se více hodí na delší výrobky. Její tuhost není tak vysoká, a proto se zde pracuje s menšími silami. Výhodou je nižší cena (obr. 30).
- Konzolová – ta má z těchto frézek nejhorší parametry, a i přesto je tou nejpoužívanější, protože má nejnižší cenu a nachází se na většině pracovištích. Její pohyb je zajištěn stolem, který se posouvá ve všech třech osách a je uložen na konzoli, která také drží vřeteno s nástrojem.



Obr. 29 Portálová frézka [24]



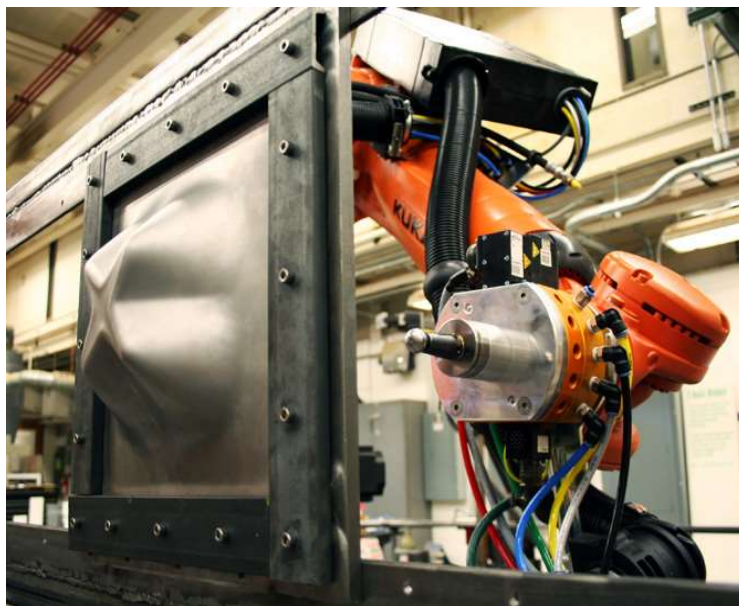
Obr. 30 Stolová frézka [25]

Další možností, jak provádět tuto technologii, je použití robotického ramene (obr. 31), jehož velkou výhodou je šestiosá manipulace s nástrojem a tím pádem jeho nastavení ideální polohy a natočení v celém pracovním čase. Díky tomu se dá současně tvářet i s více nástroji najednou, a také se zde dá snáze nastavit proces duplexního tváření s protilehlým nástrojem (obr. 32) i díky možnosti vodorovného nastavení nástroje. Zde dokonce může dojít k prohození sekundárního nástroje za primární, a tvářet tak nejen v kladném, ale i v záporném směru osy z. Další výhodou robotického ramene je velikost pracovního prostoru, která je do jisté míry

neomezená. Jasnou nevýhodou je tuhost soustavy, která není tak velká jako u CNC strojů a pro dosažení větší přesnosti si proces žádá lepší nastavení.

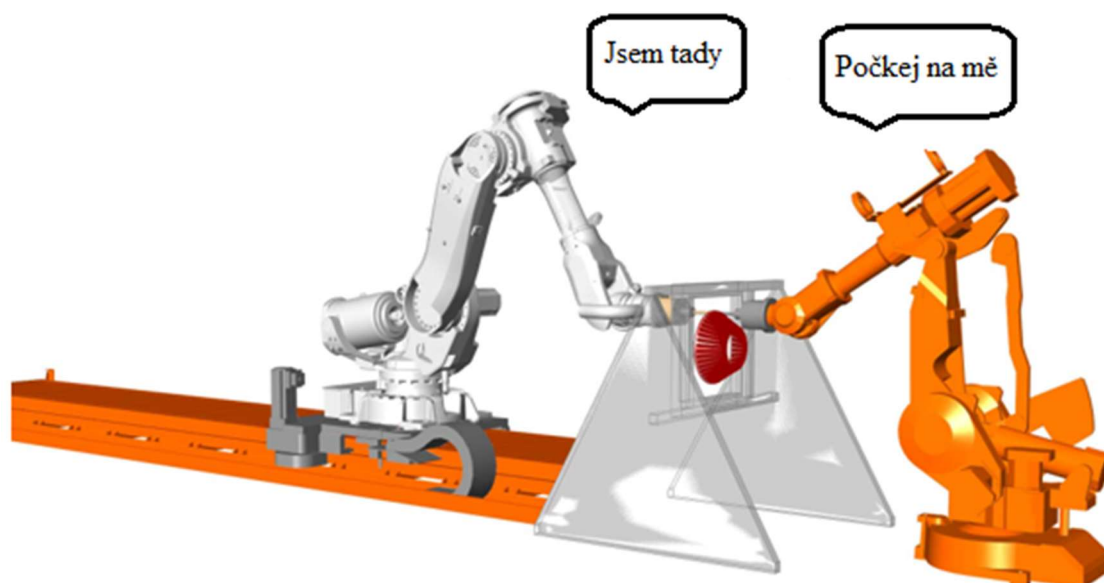
Existují i speciální stroje, které byly vytvořeny právě pro bodové tváření. Tyto stroje se primárně používají ve výzkumných zařízeních, kde jsou konstruovány přímo k určitým výkonům.

Například v roce 2004 byl na univerzitě Cambridge ve spolupráci s firmou Allwood vytvořen stroj pro jednobodové tváření se jménem Cambridge ISF.



Obr. 31 Jednobodové tváření robotickým ramenem [28]

Byl navržen tak, aby měl šest stupňů volnosti a byla snaha o snížení velikosti momentů, které působí na ložiska, po kterých se pohybuje konstrukce (obr. 33).

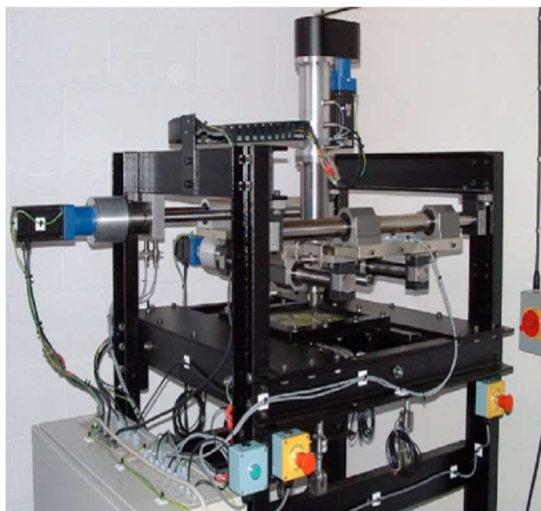


Obr. 32 Duplexní tváření dvou robotických ramen [7]

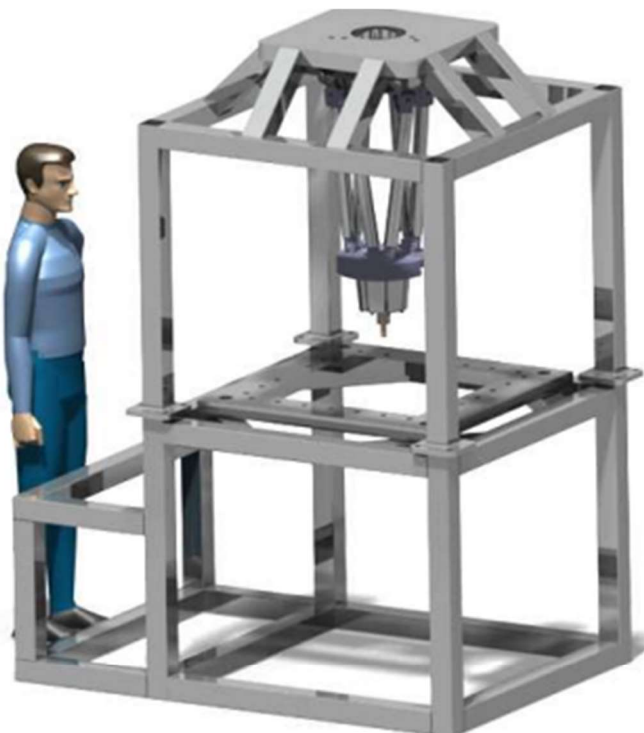
Snahou zajistit tuhost obráběcích strojů a manipulativnost robotických ramen vznikl stroj jménem SPIF-A, viz obr. 34. To umožňuje jednoduše konstruovaný, ale tuhý rám a v něm připevněná Stewartova platforma (obr. 35), která díky šesti hydraulickým pístům speciálně uložených mezi dvěma deskami zajišťuje šest stupňů volnosti, jako je tomu u robotického ramene.

Komerčním prodejem strojů uzpůsobených přímo na technologii bodového tváření se zabývá, například firma Amino Corporation (obr. 36), která poskytuje šest podobných strojů o různých rozměrech a výkonech. Nejvýkonnější stroj nabízí pracovní prostor 2500x1700 mm,

tvářecí hloubku až 600 mm, možnost tvářet plechy do tloušťky 3,6 mm a posuv v rovině xy až $60 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$



Obr. 33 Stroj Cambridge ISF [3]



Obr. 34 Stroj SPIF-A [26]



Obr. 35 Stewartova platforma [26]

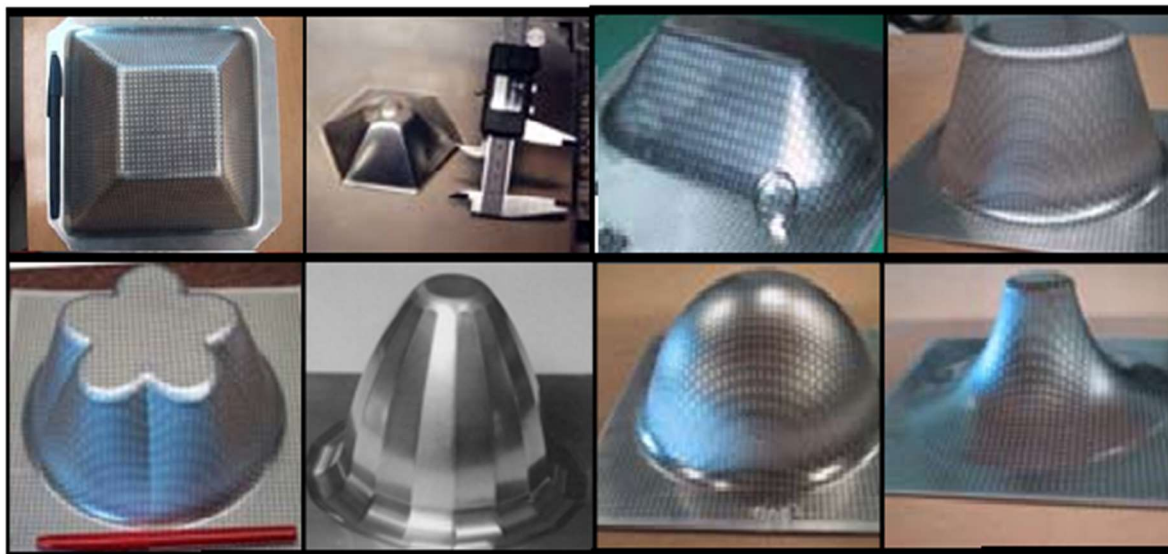


Obr. 36 Stroj Amino [3]

4 POUŽITÍ [2], [3], [6]

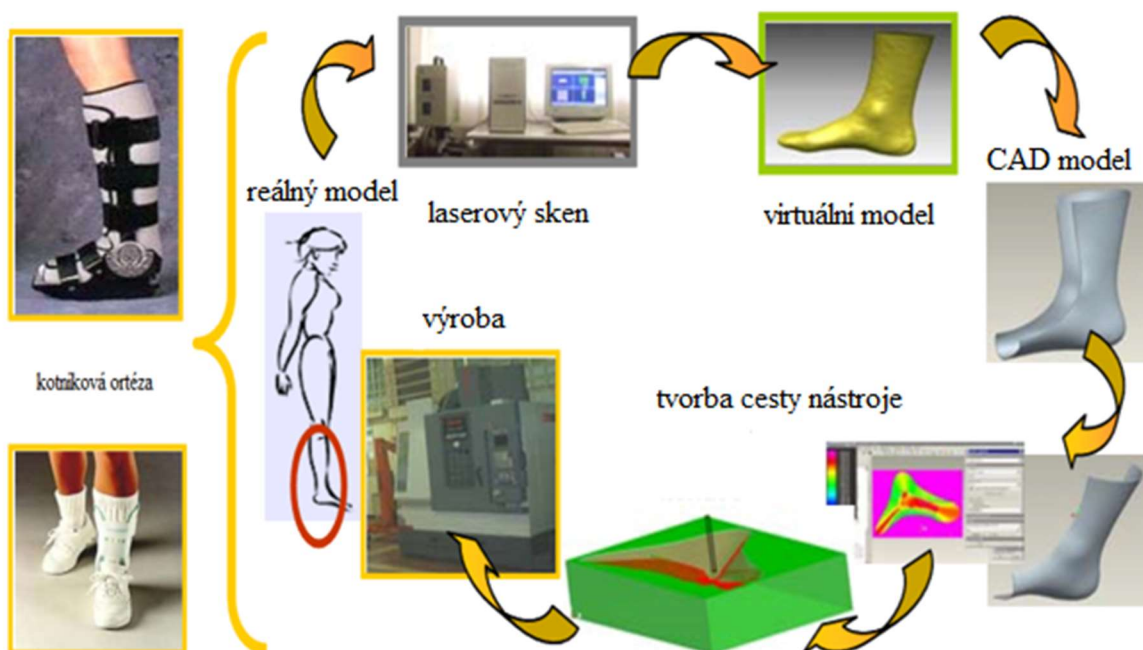
Díky snadné přípravě modelu a nepotřebě žádných složitých a drahých forem se tato technologie dá uplatnit v mnoha oborech. Výhodou je také možnost tvářet z různých materiálů, jako jsou například ocel, hliník, měď, titan nebo také z plastů či kompozitů.

Kvůli dlouhým časům výroby jednotlivých výtažků se tato technologie hodí spíše pro kusovou nebo malosériovou výrobu, a to na výrobu různých zkušebních součástí, prototypů, nebo výrobků s jedinečným tvarem. Na obrázku 37 lze vidět základní tvary vytvořené bodovým tvářením.



Obr. 37 Základní tvary [2]

Prvním důležitým oborem, kde tato technologie pomáhá, je medicína, zejména výroba implantátů a protéz. Díky možnosti tvářet libovolné tvary se vytvořený implantát může dokonale kopírovat tělo člověka a tím dosáhnout kvalitní náhrady, například při tvorbě



Obr. 38 Postup při tvorbě kotníkové ortézy bodovým tvářením [2]

kotníkové ortézy (obr. 38). Nejčastějším materiálem, který se zde používá je titan, protože je nejvíce kompatibilní s lidskou tkání. Ten se používá zejména pro lebeční nebo obličejové protézy. První lebeční protéza byla vytvořena už v roce 2005 firmou Duflou a v roce 2010 byla touto metodou vyrobena kolenní náhrada či náhradní patro, které se vyrábělo z polymeru.

Aplikaci v leteckém nebo kosmickém průmyslu mohou demonstrovat sendvičové panely, které jsou tvárné a do jisté míry nestlačitelné a používají se například na palubní desky nebo pláště kol. Jisté využití mají také ve stavebním průmyslu a architektuře.

Bodové tváření má také velký potenciál pro automobilové a dopravní aplikace. Dá se použít jak v konstrukční fázi pro výrobu testovaných dílců, tak i k tváření finálních produktů. Nevýhodou jsou zde výrobní časy a malý pracovní prostor většiny frézovacích CNC strojů. Například se zkouší vyrábět speciální blatníky nebo výfukové potrubí. Významná je také práce na japonském rychlovlaku Shinkansen, kde byl vytvořen jeho model v měřítku 1÷8 (obr. 39), který pomáhal při návrhu tohoto vlaku.



Obr. 39 Model Shinkansen [6]

5 ZÁVĚRY

Rozmach číslicově řízených strojů a robotických ramen dal vzniknout technologii bodového tváření. Tato technologie využívá dobré tvářitelnosti lokálního doteku a možnosti použití CAD softwarů. Má velký potenciál díky levnému nástroji, který se dá použít pro jakýkoliv výrobek a možnosti použití konvenčních strojů.

Princip metody je založen na vytvoření CAD modelu, díky kterému se vytvoří cesta pro nástroj, který postupně, bod po bodu, vytváří daný dílec. Vše je řízeno v kartézském souřadném systému pomocí počítačového programu. Nastavením různých parametrů, jako je hloubka posuvu nástroje, jeho poloměr nebo stěnový úhel, se dá ovlivnit přesnost výrobku nebo jeho drsnost. Technologie je dělena podle přítomnosti a typu matrice nebo podle počtu použitých nástrojů. Dělí se na jednobodové a dvoubodové tváření s úplnou nebo částečnou maticí. Při použití druhého nástroje se jedná o duplexní bodové tváření.

Díky možnosti tvářet všemožné tvary má tato technologie uplatnění v mnoha oborech. Používá se hlavně pro výrobu prototypů a specifických součástí, na které by byla potřeba drahé formy. Uplatní se ve výzkumu, lékařství, či automobilovém průmyslu. Nevýhodou můžou být značně dlouhé výrobní časy a horší přesnosti výrobků.

Samostatnou kapitolou je kovotlačení, které je už stovky let známé a běžně se provádí na klasických soustruzích i za pomoci ruční práce. Tato metoda v posledních letech má velký rozmach, hlavně při tvorbě nádobí, jako jsou hrnce a podobně.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. RAZALI, Akhtar Razul a Yi QIN. A Review on Micro-manufacturing, Micro-forming and their Key Issues. *Procedia Engineering* [online]. Perlis, 2013, 2013, 53, 665-672 [cit. 2018-05-20]. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.02.086. ISSN 18777058. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705813002051>
2. JESWIET, J., F. MICARI, G. HIRT, A. BRAMLEY, J. DUFLOU a J. ALLWOOD. Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 2005, 54(2), 88-114 [cit. 2018-05-20]. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60021-3. ISSN 00078506. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607600213>.
3. LUO, Zongwei. *Smart manufacturing innovation and transformation: interconnection and intelligence*. 1. Hershey: Business Science Reference, 2014, 406 s. Advances in logistics, operations, and management science (ALOMS), book series. ISBN 978-1466658363.
4. Cesta nástroje v CAD softwaru. In: *You Tube* [online]. 2016, 8.3. 2016 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=SS1O2JkOI-4>
5. Bodové tváření pomocí robotického ramene. In: *Alex J Fischer* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.alexjfischer.com/fall-semester-book/>
6. BEHERA, Amar Kumar, Ricardo Alves DE SOUSA, Giuseppe INGARAO a Valentin OLEKSIK. Single point incremental forming: An assessment of the progress and technology trends from 2005 to 2015. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. The Society of Manufacturing Engineers: Elsevier, 2017, 28.4. 2017, (27), 37-62 [cit. 2018-05-20]. DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.03.014. ISSN 15266125.
7. Roboforming. In: *Alex J Fischer* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.alexjfischer.com/what-is-roboforming/>
8. Kovotlačení. *Technická univerzita Liberec - fakulta strojní: Katedra strojírenské technologie* [online]. Liberec [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekcce/10.htm
9. 9 Rotační tlacení plechu s povrchovou úpravou. *MM: Trendy/tváření* [online]. Česká republika, 2001, 11.7. 2001, , 24-25 [cit. 2018-05-20]. DOI: 010725. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/rotacni-tlaceni-plechu-s-povrchovou-upravou.html>
10. Kovotlačení. *Meva* [online]. Česká republika [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.meva.eu/lisovani-a-kovotlaceni>
11. HOSFORD, William F. a Robert M. CADDELL. *Metal forming: mechanics and metallurgy*. 4. Cambridge: Cambridge University Press, 2011, 331 s. ISBN 978-1-107-00452-8.
12. Veterán. In: *J. & D. Stauch Bohemia: Karoserie* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.stauch.cz/galerie/detail/Kovotlaceni>
13. Kovotlačení v praxi. In: *Yelp* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://www.yelp.co.uk/biz_photos/kovotla%C4%8Ditelstv%C3%AD-h%C3%B6nig-nesva%C4%8Dilka?select=jKdXZRrTaGnzeFJ8sWsBQ
14. EMMENS, W.C., G. SEBASTIANI a A.H. VAN DEN BOOGAARD. The technology of Incremental Sheet Forming—A brief review of the history. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. University of Twente, The Netherlands, 2010, 210(8),

981-997 [cit. 2018-05-20]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.02.014. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013610000555>

15. Dvoubodové tváření. In: *You Tube* [online]. 2016, 12.5. 2016 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=liio1NwB5aw>
16. AMBROGIO, Giuseppina, Giuseppe INGARAO, Francesco GAGLIARDIA a Rosa DI LORENZO. Analysis of Energy Efficiency of Different Setups Able to Perform Single Point Incremental Forming (SPIF) Processes. *Procedia CIRP* [online]. Itálie, 2014, 2014, 15, 111-116 [cit. 2018-05-20]. DOI: 10.1016/j.procir.2014.06.055. ISSN 22128271. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827114004788>
17. MARTINS, P.A.F., N. BAY, M. SKJOEDT a M.B. SILVA. Theory of single point incremental forming. *CIRP Annals* [online]. Portugalsko, 2008, 2008, 57(1), 247-252 [cit. 2018-05-20]. DOI: 10.1016/j.cirp.2008.03.047. ISSN 00078506. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850608001248>
18. BEHERA, Amar Kumar, Bert LAUWERS a Joost R. DUFLOU. Tool path generation for single point incremental forming using intelligent sequencing and multi-step mesh morphing techniques. *International Journal of Material Forming* [online]. Francie: Springer-Verlag, 2014, 13.5. 2014, 8(4), 517-532 [cit. 2018-05-20]. DOI: 10.1007/s12289-014-1174-y. ISSN 1960-6206. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s12289-014-1174-y>
19. Jednobodové tváření robotickým ramenem. In: *KALO* [online]. 2017, 2017 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.ammarkalo.com/Incremental-Sheet-Metal-Forming>
20. LU, B., Y. FANG, D.K. XU, J. CHEN, H. OU, N.H. MOSER a J. CAO. Mechanism investigation of friction-related effects in single point incremental forming using a developed oblique roller-ball tool. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. Elsevier, 2014, (85), 14-29 [cit. 2018-05-20]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2014.04.007. ISSN 08906955. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695514000601>
21. Nástroj se ztenčenou stopkou. *Arch diaiy* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://www.archdaily.com/875312/ikeas-space10-lab-reimagines-craftsmanship-through-digital-techniques?ad_medium=gallery
22. JESWIET, J., D. ADAMS, M. DOOLAN, T. MCANULTY a P. GUPTA. Single point and asymmetric incremental forming. *Advances in Manufacturing* [online]. 2015, 3(4), 253-262 [cit. 2018-05-20]. DOI: 10.1007/s40436-015-0126-1. ISSN 2095-3127. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s40436-015-0126-1>
23. MIKULOVÁ, M. *Frézovací stroje současné produkce*. Brno, 2009, 34 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Petr Blecha, Ph.D.
24. Portálová frézka. In: *4isp* [online]. [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <https://cnc.inshop.cz/cnc-frezky-a-routery/frezka-s-automatickou-vymenou-nastroju-pro-4-pozice>
25. Bernardo bed milling machine BFM 2100. In: *WGM-Maschinen* [online]. [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <https://www.wgm-maschinen.de/Metallbearbeitung/Bettfraesmaschinen/Bernardo-Bettfraesmaschine-BFM-2100.html>

26. MARABUTO, S. R., J. I. V. SENA, D. AFONSO, M. A. B. E. MARTINS, R. M. COELHO, J. A. F. FERREIRA, R. A. F. VALENTE a R. J. Alves DE SOUSA. Numerical Studies and Equipment Development for Single Point Incremental Forming. *AIP Proceedings* [online]. Portugalsko: AIP Publishing, 2011, 2011, (1353), 1701-1706 [cit. 2018-05-20]. DOI: 10.1063/1.3589761. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.3589761>
27. ALVES DE SOUSA, R.J., J.A.F. FERREIRA, J.B. SA DE FARIAS, J.N.D. TORRAO, D.G. AFONSO a M.A.B.E. MARTINS. SPIF-A: on the development of a new concept of incremental forming machine. *Structural Engineering and Mechanics* [online]. Aveiro, 2014, 1.2. 2014, 49(5), 645-660 [cit. 2018-05-20]. DOI: 10.12989/sem.2014.49.5.645. ISSN 1225-4568. Dostupné z: http://koreascience.or.kr/article/ArticleFullRecord.jsp?cn=KJKHB9_2014_v49n5_645
28. Jednobodové tváření robotickým ramenem. In: *KALO* [online]. 2017 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.ammakalo.com/Incremental-Sheet-Metal-Forming>
29. Stewart platform. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2018, 8.3. 2018 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Stewart_platform
30. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. 2013 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
d_t	Průměr nástroje	[mm]
F_x	Síla působící v ose x	[N]
F_y	Síla působící v ose y	[N]
F_z	Síla působící v ose z	[N]
R	Poloměr nástroje	[mm]
R_m'	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
t	Tloušťka plechu	[mm]
t_f	Finální tloušťka plechu	[mm]
α	Stěnový úhel	[°]
α_{\max}	Maximální stěnový úhel	[°]
Δz	Posuv nástroje ve směru osy z	[mm]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Cesta nástroje v CAD softwaru [4]	9
Obr. 2 Lebeční protéza vyrobená metodou bodového tváření [3].....	9
Obr. 3 Bodové tváření pomocí robotického ramene [5].....	9
Obr. 4 Základní prvky jednobodového tváření [2]	10
Obr. 5 Dráha nástroje [7]	11
Obr. 6 Rozložení sil a ztenčení stěny při tváření [2]	12
Obr. 7 Drsnost povrchu při změně Δz [2]	12
Obr. 8 Závislost drsnosti povrchu na Δz , α , r [2]	12
Obr. 9 Odpružení materiálu [7]	13
Obr. 10 Princip kovotlačení [8]	14
Obr. 11 Kryt kola [12]	14
Obr. 12: Kovotlačení [13]	14
Obr. 13 Patent Matsubara [14]	15
Obr. 14 Dvoubodové tváření v praxi [15]	15
Obr. 15 Dvoubodové tváření s částečnou maticí [7]	15
Obr. 16 Dvoubodové tváření s úplnou maticí [7]	16
Obr. 17 Jednobodové tváření [18]	16
Obr. 18 Jednobodové tváření v praxi [19]	17
Obr. 19 Duplexní bodové tváření s nástrojem pro periferní opření [7]	17
Obr. 20 Duplexní bodové tváření s lokálním podpůrným nástrojem [7]	17
Obr. 21 Vícekrokové tažení [2]	18
Obr. 22 Optimalizace pracovního prostoru [2]	18
Obr. 23 Typy nástrojů [2], [20], [22]	19
Obr. 24 Nástroj s kuličkou [20]	19
Obr. 25 Nástroj s užší stopkou [21]	19
Obr. 26 Typy hlav nástrojů [22]	20
Obr. 27 Sekundární nástroje [7]	20
Obr. 28 Podpůrný nástroj v praxi [7]	20
Obr. 29 Portálová frézka [24]	21
Obr. 30 Stolová frézka [25]	21
Obr. 31 Jednobodové tváření robotickým ramenem [28]	22
Obr. 32 Duplexní tváření dvou robotických ramen [7]	22
Obr. 33 Stroj Cambridge ISF [3]	23
Obr. 34 Stroj SPIF-A [26]	23
Obr. 35 Stewartova platforma [26]	23
Obr. 36 Stroj Amino [3]	23
Obr. 37 Základní tvary [2]	24
Obr. 38 Postup při tvorbě kotníkové ortézy bodovým tvářením [2]	24
Obr. 39 Model Shinkansen [6]	25